

Универзитет у Београду  
Електротехнички факултет

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Марка Опачића**

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Марка Опачића** под насловом

**Раздвајање фаза на наноскали у суперпроводницима на бази гвожђа коришћењем Раманове спектроскопије**

**Nanoscale phase separation in iron-based superconductors investigated by Raman spectroscopy**

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, комисија је сачинила следећи

### РЕФЕРАТ

#### 1. УВОД

##### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Марко Опачић је 13. новембра 2012. године уписао докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул Наноелектроника и фотоника, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Испите на докторским студијама је положио са просечном оценом 10.00.

Кандидат је 22. јуна 2017. године пријавио тему за израду докторске дисертације под радним насловом „Раздвајање фаза на наноскали у суперпроводницима на бази гвожђа коришћењем Раманове спектроскопије" („Nanoscale phase separation in iron-based superconductors investigated by Raman spectroscopy”).

Комисија за студије III степена је 28. јуна 2017. године разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета је на својој седници бр. 816 одржаној 4. јула 2017. године (бр. одлуке 5022/12-1 од 13. јула 2017. године) именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу:

1. др Јелена Радовановић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

2. др Ненад Лазаревић, виши научни сарадник, Универзитет у Београду – Институт за физику у Београду и
3. др Миодраг Тасић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

За менторе су предложени:

1. Академик Зоран В. Поповић, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за физику у Београду и
2. др Милан Тадић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Јавна усмена одбрана предложене теме докторске дисертације обављена је 25. августа 2017. године на Електротехничком факултету, пред именованом комисијом. Комисија је закључила да је кандидат на јавној усменој одбрани предложене теме докторске дисертације добио оцену „задовољно“.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета усвојило је Извештај комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације кандидата на седници одржаној 7. новембра 2017. године (бр. одлуке 5022/12-2).

На седници одржаној 27. новембра 2017. године, Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Марка Опачића, под насловом „Раздвајање фаза на наноскали у суперпроводницима на бази гвожђа коришћењем Раманове спектроскопије“ („Nanoscale phase separation in iron-based superconductors investigated by Raman spectroscopy“) (бр. одлуке 61206-4778/2-17).

Кандидат је 1. марта 2018. године предао на преглед и оцену докторску дисертацију под насловом „Раздвајање фаза на наноскали у суперпроводницима на бази гвожђа коришћењем Раманове спектроскопије“ („Nanoscale phase separation in iron-based superconductors investigated by Raman spectroscopy“).

Комисија за студије III степена потврдила је 6. марта 2018. године испуњеност свих потребних услова и Наставно-научном већу Електротехничког факултета поднела предлог за именовање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације. На својој седници бр. 824 од 13. марта 2018. године, Наставно-научно веће Електротехничког факултета именovalo је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (5022/12-3 од 21. марта 2018. године) у саставу:

1. Академик Зоран В. Поповић, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за физику у Београду,
2. др Милан Тадић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
3. др Ненад Лазаревић, виши научни сарадник, Универзитет у Београду – Институт за физику у Београду,
4. др Јелена Радовановић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
5. др Владимир Арсоски, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација кандидата Марка Опачића припада области физичке електронике за коју је матичан Електротехнички факултет у Београду. Ментори дисертације академик Зоран В. Поповић, научни саветник Института за физику у Београду, Универзитета у Београду и др Милан Тадић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, активно се баве истраживањем из наведене научне области. Академик Зоран В. Поповић, потпредседник Српске академије наука и уметности, руководилац је Центра за физику чврстог стања и нове материјале Института за физику у Београду и пројекта III 45018 на коме је кандидат ангажован. У досадашњој каријери, академик Поповић објавио је преко 200 научних чланака у часописима са SCI листе уз Хиршов индекс 32. Руководио је израдама девет магистарских и 11 докторских дисертација. Милан Тадић изабран је у звање редовног професора за област физичка електроника и до сада је објавио више од 50 научних чланака у часописима са СЦИ листе. Сви ови чланци су из области наноструктура и наноелектронских направа.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат Марко Опачић рођен је у Београду 30. јуна 1988. године. Пету београдску гимназију завршио је 2007. године, када је уписао Електротехнички факултет у Београду. Дипломирао је на одсеку за Сигнале и системе 2011. године са просечном оценом 9.44. Мастер студије уписао је 2011. године на Електротехничком факултету у Београду на модулу Сигнали и системи, а завршио их је 2012. године. Докторске студије на модулу Наноелектроника и фотоника на Електротехничком факултету уписује 13. новембра 2012. године.

Кандидат је свој научно-истраживачки рад започео у Центру за физику чврстог стања и нове материјале Института за физику у Београду октобра 2012. године, где је запослен као истраживач-приправник од 1. новембра исте године. Ангажован је на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије бр. III45018 „Наноструктурни мултифункционални материјали и нанокompозити“. У звање истраживач-сарадник изабран је септембра 2014. године. Био је ангажован на више међународних пројеката. До сада је учествовао на неколико међународних конференција.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Дисертација под насловом „Раздвајање фаза на наноскали у суперпроводницима на бази гвожђа коришћењем Раманове спектроскопије“ („Nanoscale phase separation in iron-based superconductors investigated by Raman spectroscopy“) написана је на 84 стране куцаног текста на српском језику, са 29 слика и 46 нумерисаних једначина. По форми и структури одговара Упутству за обликовање докторске дисертације и Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 14. децембра 2011. године. Садржи насловну страну на српском и енглеском језику, захвалнице, резиме на српском и енглеском језику, садржај, пет глава, списак коришћене литературе који обухвата 141 библиографску референцу, страну са списком публикација кандидата,

страну са кратком биографијом кандидата и попуњене изјаве о ауторству, коришћењу и истоветности штампане и електронске верзије докторског рада. Наслови поглавља су:

1. Увод (15 страна)
2. Теорија и експеримент (17 страна)
3. Резултати и дискусија (36 страна)
4. Закључак (3 стране)

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом, уводном поглављу најпре је дат кратак историјат развоја суперпроводности. Укратко је описана најважнија теорија конвенционалних суперпроводника – BCS теорија, а потом је приказан историјски развој нових, неконвенционалних суперпроводних материјала: купрата и суперпроводника на бази гвожђа – пниктида и халкогенида. Посебна пажња поклоњена је опису физичких својстава гвожђе-халкогенида 122\*-структуре, чији је главни представник монокристал  $K_xFe_{2-y}Se_2$ , као и гвожђе-халкогенида са нискодимензионалним магнетним својствима. Потом су приказане могућности Раманове спектроскопије за дубље разумевање својстава ових материјала. Уводно поглавље завршава се описом циљева истраживања и прегледом структуре остатка дисертације.

У другом поглављу је дат приказ теорије Рамановог расејања као и детаљан опис експерименталне поставке на којој су вршена мерења и добијени резултати приказани у дисертацији. Најпре су описане основе семикласичне теорије Рамановог расејања и добијен израз за интензитет расејања. Након тога су дискутовани могући профили фононских модова који се јављају у раманским спектрима. На крају прегледа теорије разматрана је зависност енергије и полуширине фононских модова од температуре и притиска, најпре уопштено а потом су приказани детаљни модели за анализу температурске зависности енергије и полуширине, који су коришћени у трећој глави. У експерименталном делу детаљно је описан оптички пут и све главне компоненте Jobin Yvon T64000 спектрометра, као и начини његовог рада. Дате су основне информације о коришћеним узорцима и референце везане за њихову синтезу и основна својства.

Трећа глава садржи приказ и анализу оригиналних резултата дисертације. Подељена је у четири одељка. Први одељак бави се анализом температурске зависности раманских спектра монокристала  $K_xFe_{2-y}Se_2$  и  $K_{0.8}Fe_{1.8}Co_{0.2}Se_2$  у температурском опсегу од 10 K до собне температуре. Потврђено је присуство модова из обе кристалне фазе, I4/m и I4/mmm, а асигнација модова извршена је поређењем са литературно познатим спектрима. Сличност спектра мерених на узорку допираном кобалтом са онима за чист  $K_xFe_{2-y}Se_2$  потврдила је присуство уређених ваканција и у допираном материјалу. Температурска анализа енергије и полуширине модова који потичу од нискосиметричне I4/m кристалне фазе показала је да се промена полуширине може добро описати анхармонијским ефектима, а на промену енергије доминантан утицај има топлотно ширење решетке. Уочена ренормализација енергије фононског мода из I4/mmm фазе само у недопираном, суперпроводном узорку протумачена је као последица промене електронске структуре при уласку у суперпроводно стање. У другом одељку приказани су рамански спектри монокристала  $K_xFe_{2-y}Se_2$  допираних различитим концентрацијама кобалта и праћена еволуција раздвајања фаза при допирању. Утврђено је да допирањем кобалтом I4/m фаза постепено нестаје, тако да у Рамановим спектрима преостају само модови који потичу од високосиметричне кристалне фазе. Трећи одељак садржи анализу вибрационих својстава монокристала  $K_xCo_{2-y}Se_2$ . Уочена су и означена два фононска

мода, која припадају  $I4/mmm$  фази. Утврђено је да прелазак у феромагнетно стање има значајан утицај на енергију и полуширину ових мода. Наиме, оба мода имају скок енергије на критичној температури, један од њих се сужава, а други значајно шири. Ови ефекти тумачени су у светлу електрон-фононске и спин-фононске интеракције. Најзад, у четвртој одељку приказане су фононска својства монокристала  $TaFe_{1.25}Te_3$  који има нискодимензионално магнетно уређење у облику спинских ланаца. Симетријском анализом и мерењем у различитим поларизационим конфигурацијама уочено је и означено девет рамански активних мода. Температурска зависност енергије и полуширине анализираних мода углавном се може добро описати анхармонијским моделом. Једино одступање од овог модела уочава се код неколико фононских мода у близини температуре магнетног уређења, што је приписано спинским флукуацијама.

У четвртој глави су сумирани закључци дисертације и наведени могући правци даљег истраживања.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Суперпроводност је један од најважнијих феномена до сада откривених у науци о материјалима. Од самог открића, почетком 20. века, научници улажу огроман напор како у смеру теоријског објашњења ове појаве, тако и у смеру синтезе нових материјала са што већом критичном температуром. Огроман корак ка добијању виших критичних температура учињен је открићем суперпроводности у оксидним материјалима, што је мотивисало даља истраживања и довело до открића првог високотемпературског суперпроводника, који је припадао групи купрата. Након тога синтетисани су бројни купратни суперпроводници, пошто се веровало да само купрати спадају у групу неконвенционалних високотемпературских суперпроводника. Последњих година дошло је до развоја нове класе – суперпроводника на бази гвожђа, који имају врло разноврсну кристалну структуру и физичке особине. С обзиром на то да још увек не постоји општа теорија која би објаснила механизам суперпроводности код високотемпературских суперпроводника, у свету се врше интензивна експериментална и теоријска истраживања у том циљу. То је, заправо, један од најактуелнијих праваца истраживања у савременој физици кондензованог стања. Раманова спектроскопија, као веома погодна техника за испитивање динамике решетке кристалних чврстих тела, као и спрезања фонона са електронима и магнетним уређењем, може у великој мери допринети разумевању ових механизма. Вибрационе особине материјала проучаваних у дисертацији у широком опсегу температура и допирања нису до сада испитиване у литератури. Због свега наведеног, резултати дисертације кандидата представљају оригиналан и значајан допринос разумевању физичких својстава ових материјала и објашњењу механизма суперпроводности.

#### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде дисертације кандидат је детаљно истражио релевантну литературу и коректно навео радове који су у вези са темом дисертације. Наведена је укупно 141 библиографска референца. Литература садржи најновије радове из високо-реномираних часописа, релевантне за проблематику проучавану у дисертацији, што говори о актуелности и значају истраживања.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Сви резултати кандидата добијени су експерименталним мерењем Рамановог расејања и анализом добијених спектра. Резултати су подржани нумеричким симулацијама у оквиру теорије функционала густине (DFT), спроведеним у оквиру програмског пакета Quantum Espresso.

Мерења Рамановог расејања вршена су на свеже цепаним, оријентисаним монокристалним узорцима. Због осетљивости узорака на ваздуху, сва мерења су спроведена у високом вакууму. Коришћена су два раманска система, TriVista 557 и Jobin Yvon T64000, у микро-раманској конфигурацији са расејањем уназад. Као извори светлости коришћени су  $Ar^{+}/Kr^{+}$  јонски гасни ласер и чврстотелни Nd:YAG ласер. Аквизиција сигнала вршена је CCD детектором који се хлади течним азотом. Нискотемпературска мерења вршена су помоћу KONTE Cryo-Vac криостата у коме се узорак хлади течним азотом или течним хелијумом.

Анализа и обрада измерених спектра вршене су у оквиру програмског пакета Origin. Оне подразумевају усредњавање и нормирање спектра, као и теоријско моделовање фононских модова одговарајућим профилима линија, у циљу одређивања њихове енергије и полуширине, као најважнијих параметара за даљу анализу и интерпретацију добијених резултата.

Раманова спектроскопија се показала успешном и погодном техником за испитивање вибрација кристалне решетке и магнетних екситација кристала. Она такође пружа значајан увид у интеракцију фонона са електронима, таласима густине наелектрисања и магнетним уређењем, а може послужити и за утврђивање симетрије кристала.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Иако је феномен суперпроводности предмет научних истраживања скоро читав век, тачан механизам и узроци његовог настајања нису сасвим разјашњени, што се посебно односи на класу такозваних високотемпературских суперпроводника. Поред критичне температуре прелаза у суперпроводно стање, друга два параметра кључна за примену суперпроводних материјала су критична густина струје и критично магнетно поље. Услед немогућности даљег повећавања фреквенције рада полупроводничких уређаја, као једно од могућих решења је прелазак на нову, суперпроводну електронику. Материјали на бази суперпроводника на бази гвожђа најједноставније структуре (FeSe) се због својих јединствених својстава намећу као логичан избор. Данас су најшире коришћени високотемпературски суперпроводни материјали у електроенергетским системима ( $Bi, Pb$ )<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> и YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>, који су погодни и за примену код МАГЛЕВ возила. Такође, широка могућност примене Цозефсонових спојева пружа велику перспективу овим материјалима. Познавање механизма настајања суперпроводности омогућило би побољшање критичних параметара ових материјала, што би довело до њихове широке примене. С обзиром на фундаментални значај овог феномена, резултати које је кандидат постигао у оквиру свог истраживања могу допринети бољем разумевању овог механизма, као и особина суперпроводника на бази гвожђа.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је кроз рад на дисертацији овладао научно-истраживачком методологијом и показао изузетну способност за самосталан истраживачки рад, као и за рад у

истраживачком тиму. Током рада на докторату учествовао је на неколико међународних конференција, где је показао способност да јасно прикаже и дискутује своје резултате. Приликом израде дисертације у потпуности је овладао техником мерења Рамановог расејања у широком опсегу температура и у високом вакууму, као и методама за обраду и анализу добијених спектра. Приликом припреме научних чланака за публикације у водећим међународним часописима, највећи део текста је самостално писао, из чега се види да је овладао способношћу представљања научно-истраживачких резултата. У самој дисертацији су предмет и циљеви истраживања јасно дефинисани, јасно су представљене коришћене методе, а добијени резултати су на одговарајући начин представљени, анализирани и дискутовани.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

У дисертацији се јасно могу издвојити следећи научни доприноси:

- Показано је да код монокристала  $K_xFe_{2-y}Se_2$  долази до ренормализације енергије раманског мода који потиче од суперпроводне фазе на критичној температури. То је највероватније последица промене електронске структуре при уласку у суперпроводно стање. На основу ове ренормализације процењена је и вредност константе електрон-фонон интеракције.
- Праћене су структурне промене у монокристалима  $K_xFe_{2-y}Se_2$  при допирању кобалтом. Утврђено је да при ниским концентрацијама кобалта постоје две кристалне фазе. Повећањем садржаја кобалта уређене ваканције постепено исчезавају, да би код чистог  $K_xCo_{2-y}Se_2$  преостала само високосиметрична кристална фаза.
- Утврђено је да прелазак у магнетно уређено стање има знатан утицај на динамику решетке монокристала  $K_xCo_{2-y}Se_2$ , што се испољава кроз нагле промене енергије и полуширине уочених фононских модова. Ове промене дискутоване су у светлу електрон-фонон и спин-фонон интеракције, као и кристалног неуређења.
- На основу анализе вибрационих спектра монокристала  $TaFe_{1.25}Te_3$  показано је да је магнетни фазни прелаз код овог материјала континуалан, тј. другог реда. Око температуре прелаза у антиферомагнетно уређење утврђено је присуство спинских флукуација.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Иако су вибрационе особине монокристала  $K_xFe_{2-y}Se_2$  проучаване у неколико чланака, у оквиру ове дисертације по први пут је урађена температурска анализа енергије и полуширине за уочене фононске модове. Утврђено је да је температурска зависност енергије фонона доминантно одређена топлотним ширењем кристалне решетке, а промена полуширине при промени температуре се добро описује анхармонијским моделом. Веома значајан резултат је утврђена ренормализација фононских спектра узрокована суперпроводношћу.

У дисертацији је спроведено прво детаљно испитивање структурних промена у монокристалу  $K_xFe_{2-y}Se_2$  допираном различитим концентрацијама кобалта и утврђено је постепено исчезавање уређења ваканција при повећању садржаја кобалта. Први пут су проучаване вибрациона својства монокристала  $K_xCo_{2-y}Se_2$  и показано је да магнетно

уређење има велики утицај на динамику решетке овог материјала. Ови резултати подржани су нумеричким симулацијама.

Такође, по први пут у научној литератури, проучавана су фононска својства квазиједнодимензионалног магнетног материјала  $\text{TaFe}_{1.25}\text{Te}_3$ . Извршена је компаративна анализа са материјалом који испољава значајне сличности,  $\text{FeTe}$ , и утврђено да, за разлику од монокристала  $\text{FeTe}$ , код  $\text{TaFe}_{1.25}\text{Te}_3$  не долази до значајних одступања у температурској зависности енергије и полуширине испитиваних модова. На основу тога изведен је закључак да је магнетни фазни прелаз континуалан.

Због свега наведеног, истраживања у оквиру дисертације кандидата довела су до веома значајног унапређења постојећих знања у области динамичких својстава поменутих материјала.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Током своје досадашње научне каријере Марко Опачић је постигао изузетне резултате објавивши 6 радова у врхунским међународним часописима (M21) и један рад у међународном часопису (M23). Истраживања објављена у радовима у часописима M21 категорије под редним бројевима 3, 4, 5 и 6 чине основ за дисертацију кандидата, а рад M23 категорије је прегледни рад у коме су такође приказани делови истраживања из дисертације кандидата. Поред тога, кандидат је учествовао на неколико међународних конференција.

#### **Радови у врхунским међународним часописима (M21):**

1. N. Lazarević, E. S. Božin, M. Šćepanović, **M. Оpačić**, Hechang Lei, C. Petrovic, and Z. V. Popović, Probing  $\text{IrTe}_2$  crystal symmetry by polarized Raman scattering, *Phys. Rev. B* **89** (2014) 224301 (DOI: 10.1103/PhysRevB.89.224301, IF = 3.767, ISSN: 2469-9969).
2. Z. V. Popović, M. Šćepanović, N. Lazarević, **M. Оpačić**, M. M. Radonjić, D. Tanasković, H. Lei, and C. Petrovic, Lattice dynamics of  $\text{BaFe}_2\text{X}_3$  (X = S, Se) compounds, *Phys. Rev. B* **91** (2015) 064303 (DOI: 10.1103/PhysRevB.91.064303, IF = 3.736, ISSN: 2469-9969).
3. **M. Оpačić**, N. Lazarević, M. Šćepanović, H. Ryu, H. Lei, C. Petrovic, and Z. V. Popović, Evidence of superconductivity-induced phonon spectra renormalization in alkali-doped iron selenides, *Journal of Physics: Condensed Matter* **27** (2015) 485701 (DOI: 10.1088/0953-8984/27/48/485701, IF = 2.346, ISSN: 0953-8984).
4. H. Ryu, K. Wang, **M. Оpačić**, N. Lazarević, J. B. Warren, Z. V. Popović, E. S. Bozin, and C. Petrovic, Sustained phase separation and spin glass in Co-doped  $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$  single crystals, *Phys. Rev. B* **92** (2015) 174522 (DOI: 10.1103/PhysRevB.92.174522, IF = 3.736, ISSN: 2469-9969).
5. **M. Оpačić**, N. Lazarević, M. M. Radonjić, M. Šćepanović, H. Ryu, A. Wang, D. Tanasković, C. Petrovic, and Z. V. Popović, Raman spectroscopy of  $\text{K}_x\text{Co}_{2-y}\text{Se}_2$  single crystals near the ferromagnet-paramagnet transition, *Journal of Physics: Condensed Matter* **28** (2016) 485401 (DOI: 10.1088/0953-8984/28/48/485401, IF = 2.678, ISSN: 0953-8984).
6. **M. Оpačić**, N. Lazarević, D. Tanasković, M. M. Radonjić, A. Milosavljević, Yongchang Ma, C. Petrovic, and Z. V. Popović, Small influence of magnetic ordering on lattice dynamics in  $\text{TaFe}_{1.25}\text{Te}_3$ , *Phys. Rev. B* **96** (2017) 174303 (DOI: 10.1103/PhysRevB.96.174303, IF = 3.836, ISSN: 2469-9969).



## Радови у међународним часописима (M23):

1. **М. Орачић** and N. Lazarević, Lattice dynamics of iron chalcogenides: Raman scattering study, *J. Serb. Chem. Soc.* **82 (9)** (2017), 957-983 (DOI: 10.2298/JSC1703210770, IF = 0.970, ISSN: 1820-7421).

## Саопштења са међународног скупа штампана у изводу (M34):

1. **М. Орачић**, N. Lazarević, M. M. Radonjić, M. Šćepanović, H. Lei, D. Tanasković, C. Petrovic, and Z. V. Popović, Raman scattering study of  $\text{KCo}_2\text{Se}_2$ , *Twelfth Young Researcher's Conference – Materials Science and Engineering*, p. 29, Belgrade, Serbia, December 11th-13th, (2013).
2. N. Lazarević, **М. Орачић**, M. Šćepanović, H. Ryu, H. Lei, C. Petrovic, and Z. V. Popović, Raman scattering in Iron-Based Superconductors and Related Materials, *XIX Symposium on Condensed Matter Physics, SFKM 2015*, p. 29, Belgrade, Serbia, September 7th-11th, (2015).
3. **М. Орачић**, N. Lazarević, M. Šćepanović, H. Ryu, H. Lei, C. Petrovic, and Z. V. Popović, Suppression of vacancy ordering and phonon energy renormalization in Co-doped  $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$  single crystals, *Fourteenth Young Researcher's Conference – Materials Science and Engineering*, p. 33, Belgrade, Serbia, December 9th-11th, (2015).
4. N. Lazarević, **М. Орачић**, M. Radonjić, D. Tanasković, H. Ryu, M. Šćepanović, C. Petrovic, and Z. V. Popović, Vacancies and phase separation in pure and transition metal doped  $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ , *International Workshop on Iron-Based Superconductors*, p. 67, Munich, Germany, September 13th-16th, (2016).
5. **М. Орачић**, N. Lazarević, D. Tanasković, M. Radonjić, A. Milosavljević, Yongchang Ma, C. Petrovic, and Z. V. Popović, Small influence of magnetic ordering on lattice dynamics in  $\text{TaFe}_{1.25}\text{Te}_3$ , *Sixteenth Young Researcher's Conference – Materials Science and Engineering*, p. 42, Belgrade, Serbia, December 6th-8th, (2017).

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега наведеног, Комисија констатује да докторска дисертација Марка Опачића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом „Раздвајање фаза на наноскали у суперпроводницима на бази гвожђа коришћењем Раманове спектроскопије" („Nanoscale phase separation in iron-based superconductors investigated by Raman spectroscopy"), испуњава све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

Докторска дисертација кандидата Марка Опачића се бави вибрационим својствима материјала из групе суперпроводника на бази гвожђа и нискодимензионалних магнетних материјала. У дисертацији је показано да при уласку у суперпроводно стање у монокристалу  $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$  долази до ренормализације енергије фононског мода који потиче од суперпроводне фазе. Успешно су праћене структурне промене код овог монокристала допираног кобалтом у зависности од нивоа допирања. Утврђено је да магнетно уређење има значајан утицај на вибрациона својства  $\text{K}_x\text{Co}_{2-y}\text{Se}_2$ . На основу

анализе фононских спектра монокристала  $\text{TaFe}_{1.25}\text{Te}_3$  показано је да је магнетни фазни прелаз код овог материјала континуалан. Резултате проистекле из истраживања спроведеног у оквиру докторске дисертације кандидат је објавио у врхунским међународним часописима и представио стручној јавности на међународним конференцијама. На основу увида у докторску дисертацију и радове кандидата, Комисија констатује да дисертација представља изузетно оригиналан и савремен научни допринос, и да је кандидат током израде дисертације показао способност за самосталан научно-истраживачки рад.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под називом „Раздвајање фаза на наноскали у суперпроводницима на бази гвожђа коришћењем Раманове спектроскопије" („Nanoscale phase separation in iron-based superconductors investigated by Raman spectroscopy") кандидата Марка Опачића прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 25. март 2018. године

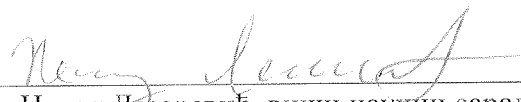
#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



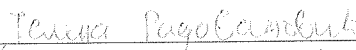
академик Зоран В. Поповић, научни саветник,  
Универзитет у Београду – Институт за физику



др Милан Тадић, редовни професор,  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Ненад Лазаревић, виши научни сарадник,  
Универзитет у Београду – Институт за физику



др Јелена Радовановић, редовни професор,  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Владимир Арсоки, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет